

Karolina Mostowik, Beata Jastrzębska
Kinga Kowalik, Przemysław Powroźnik
Marta Pufelska, Bartłomiej Rzonca, Janusz Siwek

Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30–387 Kraków
karolina.mostowik@doctoral.uj.edu.pl
b.rzonca@uj.edu.pl; j.siwek@uj.edu.pl

Received: 8.03.2019

Reviewed: 11.05.2019

ODPŁYW PODZIEMNY ZE ZLEWNI ELEMENTARNYCH W BIESZCZADACH

Groundwater runoff in elementary catchments in the Bieszczady Mountains

Abstract: Groundwater recharge is crucial for river flow during dry periods. However, due to low retention capacity of rocks and quick surface flow, groundwater resources in flysch areas such as the Bieszczady Mountains are considered to be quite low. The aim of the study was (1) to identify spatial distribution of specific runoff during dry periods in small catchments in the Bieszczady Mountains and (2) to define relations between catchment characteristics and runoff. Four datasets consisting of specific runoff during low flow periods in selected catchments of the Bieszczady Mountains were used in this study. Data collected during dry periods allowed to identify total river flow with groundwater recharge. Specific runoff varied substantially in the studied catchments (from 0.9 to 7.7 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). The highest specific runoff values were obtained in catchments with steep slopes, a high altitude range and prevalence of sandstone formations. However, there is no correlation between specific runoff and catchment area and mean catchment elevation.

Key words: groundwater resources, specific runoff, small catchments.

Wstęp

Wielkość składowej podziemnej odpływu rzeczno-górnego w obszarach górskich uzależniona jest od zespołu czynników, z których najistotniejszymi są rozmieszczenie, rozkład czasowy i forma opadów, przepuszczalność i zdolność retencyjna podłoża oraz ukształtowanie i użytkowanie terenu. Przestrzenne zróżnicowanie tych parametrów, a także zmienne warunki hydrometeorologiczne decydują o tym, że udział poszczególnych zlewni elementarnych w kształtowaniu zasobów całości dorzecza jest różny, co więcej może być także zmienny w czasie. W górach zbudowanych ze skał fliszowych, takich jak Karpaty Zewnętrzne, w tym Bieszczady, warstwy wodonośne są generalnie mało zasobne (Jokiel 1994; Chowaniec 1998/1999), a chwilowa zasobność jest w znacznym stopniu uzależniona od bieżących warunków zasilania. W obszarach górskich częstą prawidłowością jest więc niewielki udział zasilania podziemnego w odpływie całkowitym (Dynowska 1971), przy jednocześnie wysokim, względem terenów otaczających, odpływie jednostkowym pocho-

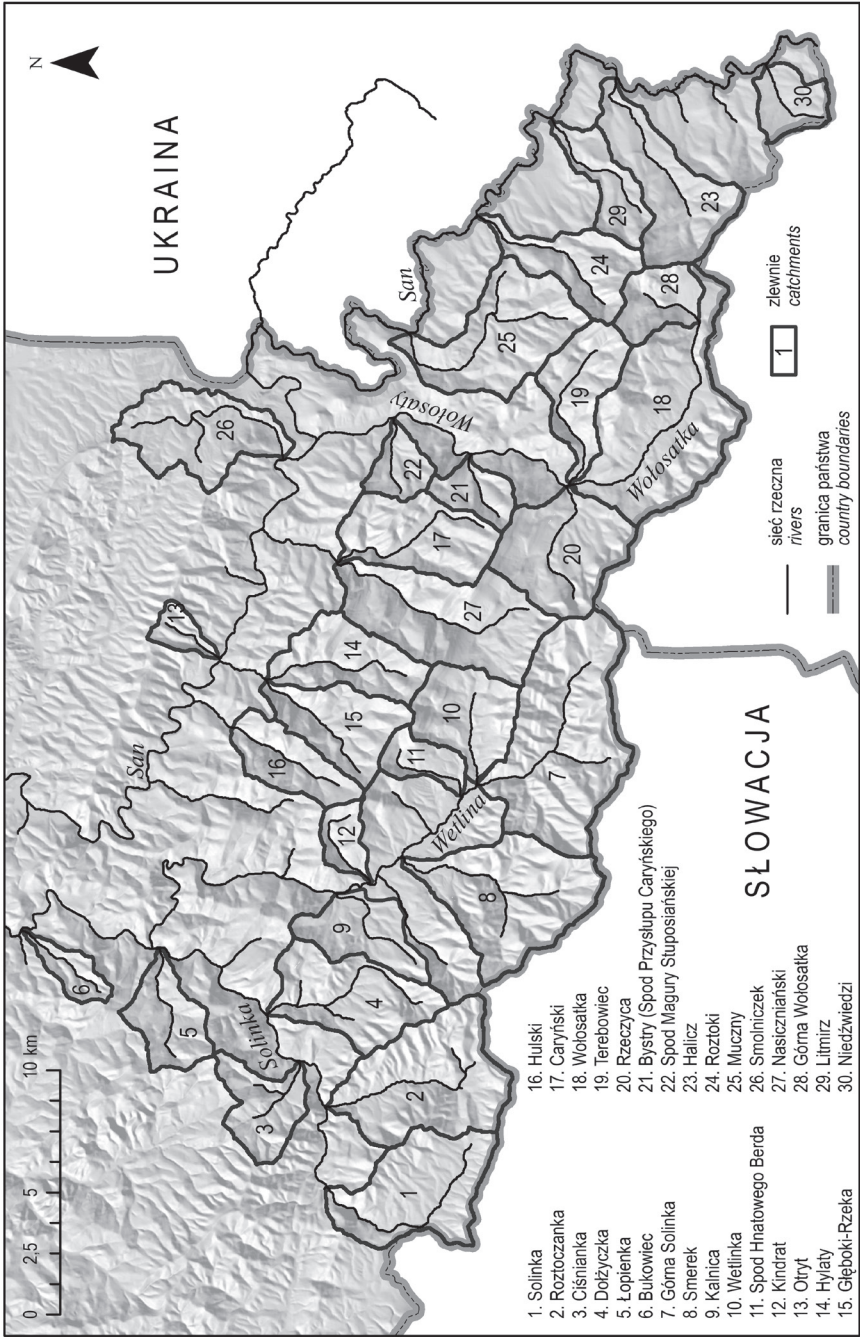
dzenia podziemnego (Jokiel 1994; Bartnik 2005). Dodatkowo ocenia się, że odpływ rzeczny w obszarach górskich jest wyjątkowo wrażliwy na zmieniające się warunki klimatyczne – szczególnie na zmiany temperatury powietrza i opadów atmosferycznych (Birsan i in. 2005; Viviroli i in. 2011). Odnawianiu zasobów wód podziemnych nie sprzyjają wydłużające się okresy bezopadowe oraz wzrost częstości i intensywności krótkotrwałych opadów o dużym natężeniu, notowane w ostatnich latach (Kowalczyk 2016; Staśko i in. 2017; Pińskwar i in. 2018).

W Bieszczadach zaopatrzenie ludności w wodę oparte jest przede wszystkim na ujęciach wód powierzchniowych. Zatem długotrwałe niżówki (okresy wyłącznie podziemnego zasilania cieków), występujące zwykle w okresie letnio-jesiennym mogą generować okresowe niedobory wody (Rzonca i in. 2016). Stąd też, problematyka zasobów wód podziemnych zasilających cieki w okresach niżówkowych jest ważna nie tylko ze względów środowiskowych, lecz także z w kontekście zaopatrzenia ludności w wodę. Zwykle informacja o składowej podziemnej odpływu rzeczno jest przedstawiana dla zlewni kontrolowanych o stosunkowo dużych powierzchniach – w Bieszczadach są to zlewnie od ok. 100 do prawie 500 km², na których zamknięciu funkcjonują posterunki hydrometryczne IMGW. Tymczasem bardziej szczegółowe badania, przeprowadzone w zlewniach elementarnych, wskazują na istotne zróżnicowanie podziemnego odpływu jednostkowego, zarówno w Bieszczadach (Łajczak 1996; Plenzler i in. 2010; Rzonca i Siwek 2011; Rzonca i in. 2016), jak i w innych obszarach górskich Polski (Kryza i in. 1989; Ciężkowski i in. 1999; Humnicki 2003; Kostuch 2003; Franczak i in. 2015; Łajczak 2016; Buczyński 2017). Dostępność dotychczas opublikowanych danych dotyczących podziemnego odpływu jednostkowego w Bieszczadach (Plenzler i in. 2010; Dojrowska 2016; Rzonca i in. 2016), przeprowadzenie kolejnych pomiarów przepływu w okresie niskich stanów wód w 2016 r. oraz uwzględnienie charakterystyk zlewni elementarnych pozwalają na bardziej szczegółowe rozpoznanie zróżnicowania i uwarunkowań podziemnego odpływu jednostkowego w Bieszczadach. Zestawienie wspomnianych wyników badań pozwoli odpowiedzieć na następujące pytania badawcze: 1) czy występują prawidłowości w przestrzennym zróżnicowaniu podziemnego odpływu jednostkowego? oraz 2) czy istnieje związek między wielkością podziemnego odpływu jednostkowego a parametrami zlewni: wysokością, nachyleniem, ekspozycją lub budową geologiczną?

Obszar badań

Badania objęły elementarne zlewnie w dorzeczu Sanu powyżej Zbiornika Solińskiego w Bieszczadach – w większości są to zlewnie dopływów Solinki, Wołosatego, Wetlinki, jak też zlewnie potoków uchodzących bezpośrednio do Sanu (Ryc. 1). Analizowane zlewnie mają powierzchnię od 3,3 km² do 44,3 km².

W budowie geologicznej Bieszczadów wyróżnia się dwie fliszowe jednostki tektoniczno-facjalne, tj. jednostkę śląską i nasuniętą na nią od południa



Ryc. 1. Lokalizacja badanych zlewni elementarnych na tle sieci hydrograficznej górnego Sanu.

Fig. 1. Selected catchments on the background of the Upper San River drainage system.

jednostkę dukielską. W południowej części jednostki śląskiej wyróżnia się strefę przeddukielską charakteryzującą się chaotycznym kompleksem cienkoławicowego fliszu z dużym udziałem łupków (Ślącza i Żytko 1978). Zasadniczo kompleksy fliszowe Bieszczadów cechują się niewielką zdolnością retencyjną i zasobnością zbiorników wód podziemnych (Jokiel 1994; Mostowik i in. 2018).

Rzeki bieszczadzkie odznaczają się reżimem niewyrównanym, niwalno-pluwialnym (Dynowska 1997) z maksimum przepływu w okresie roztopowym, występującym od marca do maja oraz minimum sierpniowo-wrzesniowym. Średni wieloletni (1961–2015) całkowity odpływ jednostkowy ze zlewni Solinki (Terka) i Sanu (Dwernik) wynosi odpowiednio 23 i 27 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Mostowik 2017), przy czym w mniejszych zlewniach odwadniających najwyższe pasma Bieszczadów notowano nawet 45 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Łajczak 1996). Udział odpływu podziemnego w odpływie całkowitym wynosi od 25 do 45%, co oznacza średnie wartości podziemnego odpływu jednostkowego od 6 do ponad 10 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Łajczak 1996; Tomaszewski 2001).

Dane i metody badań

Pomiary przepływu wody w ciekach zostały przeprowadzone w dniach 21–22.09.2016 w 28 małych, niekontrolowanych zlewniach w Bieszczadach Wysokich. W pracy wykorzystano również wyniki pomiarów przepływu cieków z lat 2009 i 2015 (Tab. 1). Wszystkie pomiary uwzględnione w pracy zostały wykonane za pomocą młynka hydrometrycznego HEGA–1, przystosowanego do badania przepływu bardzo małych i małych cieków. Pomierzone wartości przepływu odniesiono do powierzchni zlewni i przedstawiono w pracy w postaci chwilowego (odnoszącego się do konkretnego pomiaru) odpływu jednostkowego.

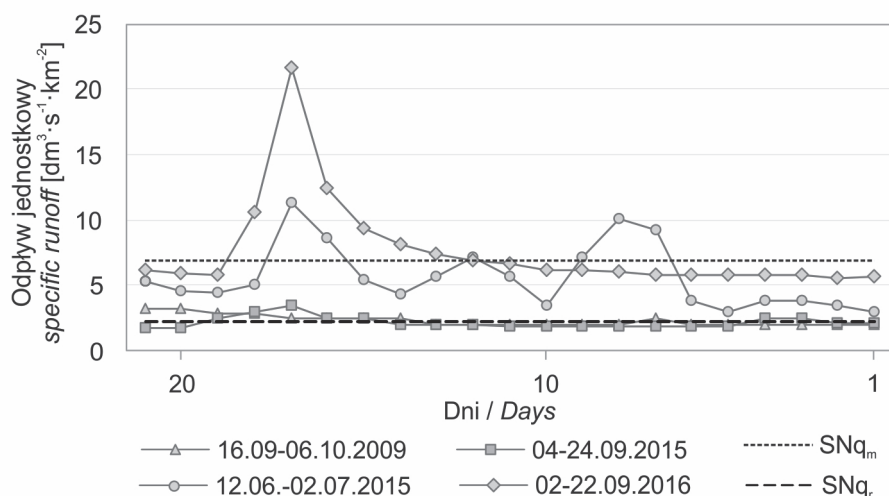
Wszystkie wykorzystane w pracy pomiary przeprowadzone były w warunkach niskich przepływów rzek. Warunki hydrologiczne poprzedzające te pomiary przedstawiono prezentując dobowe wartości przepływu Sanu w profilu Zatwarnica z okresu 3 tygodni przed przeprowadzeniem badań (dane IMGW) – Ryc. 2. Na

Tabela 1. Uwzględnione w pracy serie pomiarowe.

Table 1. Datasets used in the study.

Okres badań <i>Study period</i>	Liczba zlewni <i>Number of catchments</i>	Źródło danych <i>Data source</i>
21-22.09.2016	28	badania własne <i>own study</i>
22-24.09.2015	10	Rzonca i in. 2016
1-2.07.2015	7	Dojrowska 2016
3-6.10.2009	30	Plenzler i in. 2010

podstawie przepływów Sanu w Zatwarnicy z lat 1986–2015 wyznaczono również średni niski odpływ jednostkowy, zarówno z minimów miesięcznych (SNq_m) jak i z minimów rocznych (SNq_r). SNq_r najczęściej jest utożsamiane z odpływem podziemnym bazowym, najbardziej trwałą formą odpływu podziemnego (Chełmicki i Pociask-Karteczka 2006). Pomiaru w okresach 03–06.10.2009, 01–02.07.2015 i 22–24.09.2015 przeprowadzono w warunkach bardzo niskich przepływów rzek – świadczą o tym odpływy jednostkowe Sanu w profilu Zatwarnica zbliżone w tych okresach do wartości SNq_r . We wrześniu 2016 r. wartości odpływu jednostkowego były wyższe niż w pozostałych okresach pomiarowych, ale nadal poniżej SNq_m .



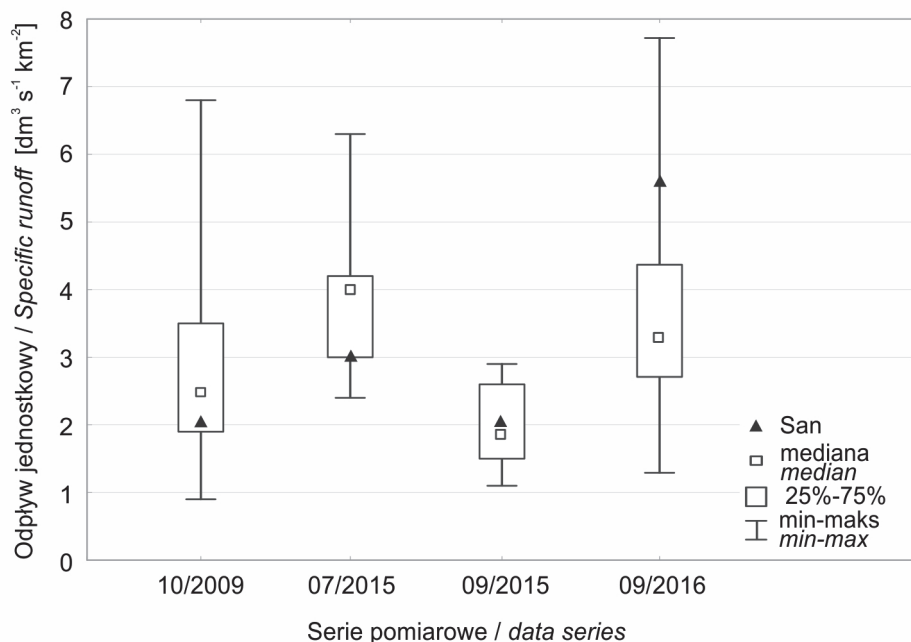
Ryc. 2. Odpływ jednostkowy na Sanie w Zatwarnicy w okresie 21 dni poprzedzających serie pomiarowe. Uwzględniono również SNq_r i SNq_m .

Fig. 2. Specific runoff at San River (Zatwarnica gauging site) in the period of 21 days before measurements. Extreme low runoff (SNq_r) and low runoff (SNq_m) are included.

Granice i powierzchnie analizowanych zlewni, średnie nachylenie terenu, minimalną, maksymalną i średnią wysokość zlewni oraz ekspozycję stoków (Załącznik 1) określono na podstawie numerycznego modelu terenu SRTM o rozdzielczości 25 m (NASA JPL 2013). Dodatkowo określono udział głównych jednostek geologicznych w poszczególnych zlewniach na podstawie Szczegółowych Map Geologicznych Polski w skali 1:50 000 (Haczewski i in. 1998; Jankowski i Ślęczka 2000; Haczewski i in. 2001; Malata i in. 2006; Jankowski 2009; Rubinkiewicz i Tomaszczyk 2009). Wyodrębniono jednostkę śląską (z wyłączeniem strefy przeddukielskiej), strefę przeddukielską i jednostkę dukielską. Następnie wykonano analizę korelacji (korelacja liniowa Pearsona) między wymienionymi parametrami zlewni a odpływem jednostkowym w każdej z analizowanych serii pomiarowych, zakładając poziom istotności $\alpha=0,05$.

Wyniki

Przeprowadzona w pracy analiza odpływów jednostkowych dotyczy wybranych czterech okresów niżówkowych, zatem przedstawione wyniki są przybliżeniem informacji o odpływie podziemnym ze zlewni elementarnych i nie prezentują wartości średnich. Odpływ jednostkowy w badanych okresach wykazuje przestrzenne zróżnicowanie, w obrębie którego zauważalne są pewne prawidłowości. Wyraźnie widoczne jest zróżnicowanie zasobności drenowanych zbiorników wód podziemnych między poszczególnymi seriami pomiarowymi (Ryc. 3–7), z najniższymi wartościami odpływu jednostkowego jesienią 2015 r. (od 1,1 do 2,9 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), a najwyższymi jesienią 2016 r. (od 1,3 do 7,7 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) – Ryc. 3. Przyjmując zlewnię Sanu (profil Zatwarnica) za referencyjną względem zlewni elementarnych, należy zwrócić uwagę na znaczne różnice między odpływem jednostkowym z tych zlewni a uśrednionym odpływem z większej zlewni Sanu. Wielkość podziemnego odpływu jednostkowego w małych zlewniach względem zlewni Sanu w poszczególnych seriach pomiarowych wynosiła od 50% do ponad 300% wartości referencyjnej (San – Zatwarnica, Ryc. 3).



Ryc. 3. Odpływ jednostkowy w badanych zlewniach w poszczególnych seriach pomiarowych. Uwzględniono również odpływ jednostkowy ze zlewni Sanu w profilu Zatwarnica (źródło danych: IMGW).

Fig. 3. Specific runoff in studied catchments during selected study periods. Specific runoff in the San River catchment at Zatwarnica gauging site included (data source: IMGW).

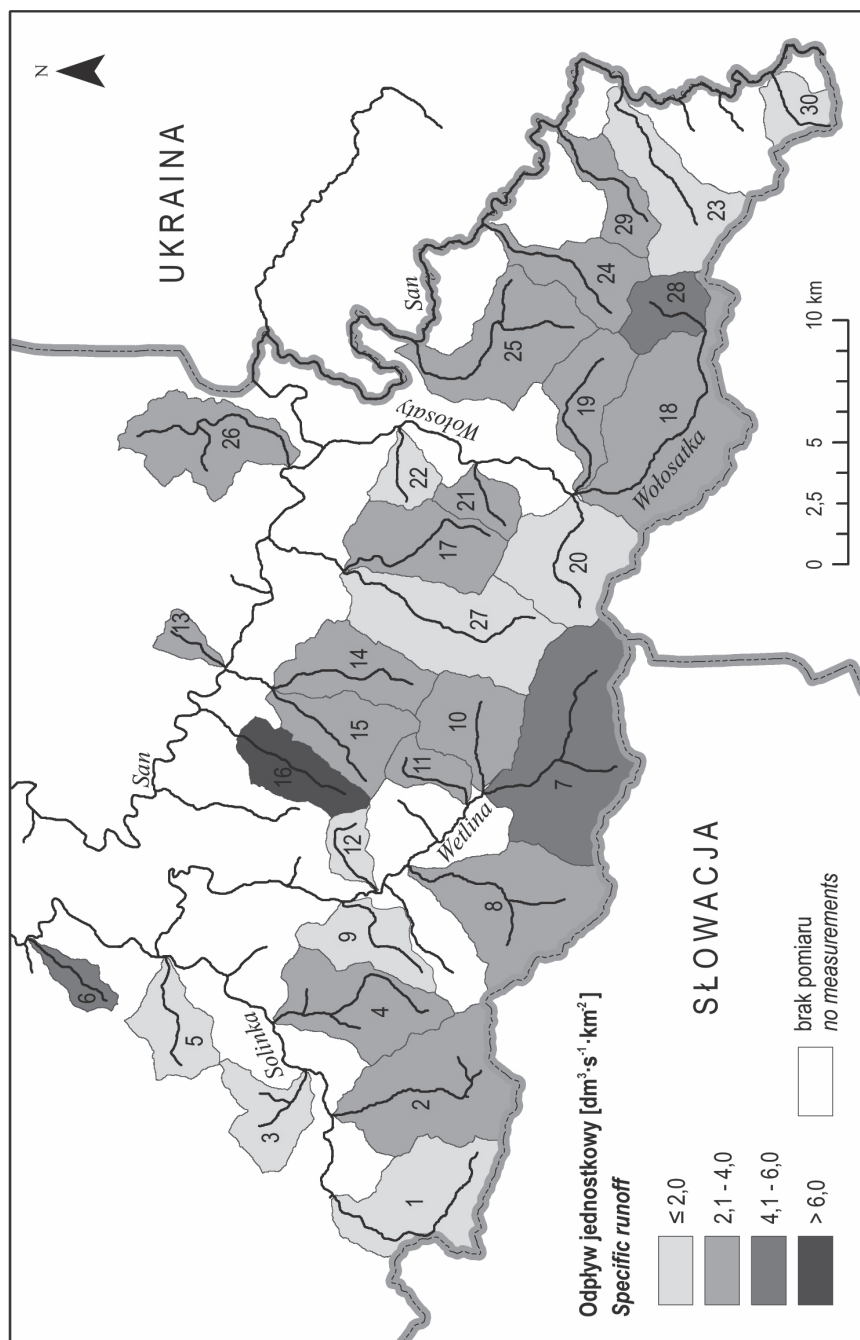
W seriach pomiarowych z 2009 i 2016 r. najniższe wartości odpływu jednostkowego odnotowano w zlewni Niedźwiedziego, Halicza i Kalnicy, natomiast najwyższe wartości wykazano w zlewniach górnej Solinki, górnej Wołosatki, Terebowca, Mucznego i potoków odwadniających północne stoki Połoniny Wetlińskiej – Hulskiego i Głębokiego-Rzeki (Ryc. 4, Ryc. 7). Podobnie, różnice w wartościach podziemnego odpływu jednostkowego zauważono analizując pomiary odpływu przeprowadzone w mniejszej liczbie zlewni w 2015 r. (Ryc. 5, Ryc. 6). W lipcu i we wrześniu 2015 r. zlewnie potoków odwadniających północny stok Połoniny Wetlińskiej (Hulski, Głęboki-Rzeka, Hylaty) i Terebowca wyróżniały się jako najbardziej zasobne. Na podstawie analizy korelacji pomiędzy wartościami odpływu jednostkowego w badanych zlewniach w poszczególnych seriach pomiarowych, można wskazać jedynie dwie istotne statystycznie zależności (Tab. 2) – między serią pomiarową z września 2016 a seriami z października 2009 ($r=0,38$) i lipca 2015 ($r=0,85$). W pozostałych przypadkach nie stwierdzono związku między odpływem jednostkowym ze zlewni elementarnych w różnych okresach niżówkowych.

Wartości podziemnego odpływu jednostkowego z poszczególnych serii pomiarowych skorelowano również z wcześniej zdefiniowanymi parametrami zlewni (Tab. 2). Najbardziej wyraźny jest związek wzrostu wielkości podziemnego odpływu jednostkowego ze wzrostem średniego nachylenia zlewni i wzrostem deniwelacji zlewni. Co ciekawe, brak jest wyraźnej zależności między podziemnym odpływem jednostkowym a średnią wysokością zlewni i jej powierzchnią. Brak jest również istotnego związku między udziałem podstawowych jednostek geologicznych w budowie zlewni a odpływem jednostkowym. Warto jednak zauważyć pewną prawidłowość – współczynnik korelacji między odpływem jednostkowym a udziałem skał jednostki śląskiej w budowie geologicznej zlewni przyjmuje wartości dodatnie, natomiast w przypadku udziału skał strefy przeddukielskiej wartości współczynnika korelacji są ujemne (Tab. 2). Podobnie, w przypadku zlewni o dużym udziale ekspozycji północnej współczynnik korelacji przyjmuje dodatnie wartości, natomiast w zlewniach o znaczącym udziale ekspozycji południowej zależność między ekspozycją a odpływem jednostkowym jest ujemna.

Tabela 2. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy podziemnym odpływem jednostkowym (q) w badanych okresach oraz wybranymi parametrami zlewni. Korelacje istotne statystycznie pogrubiono.

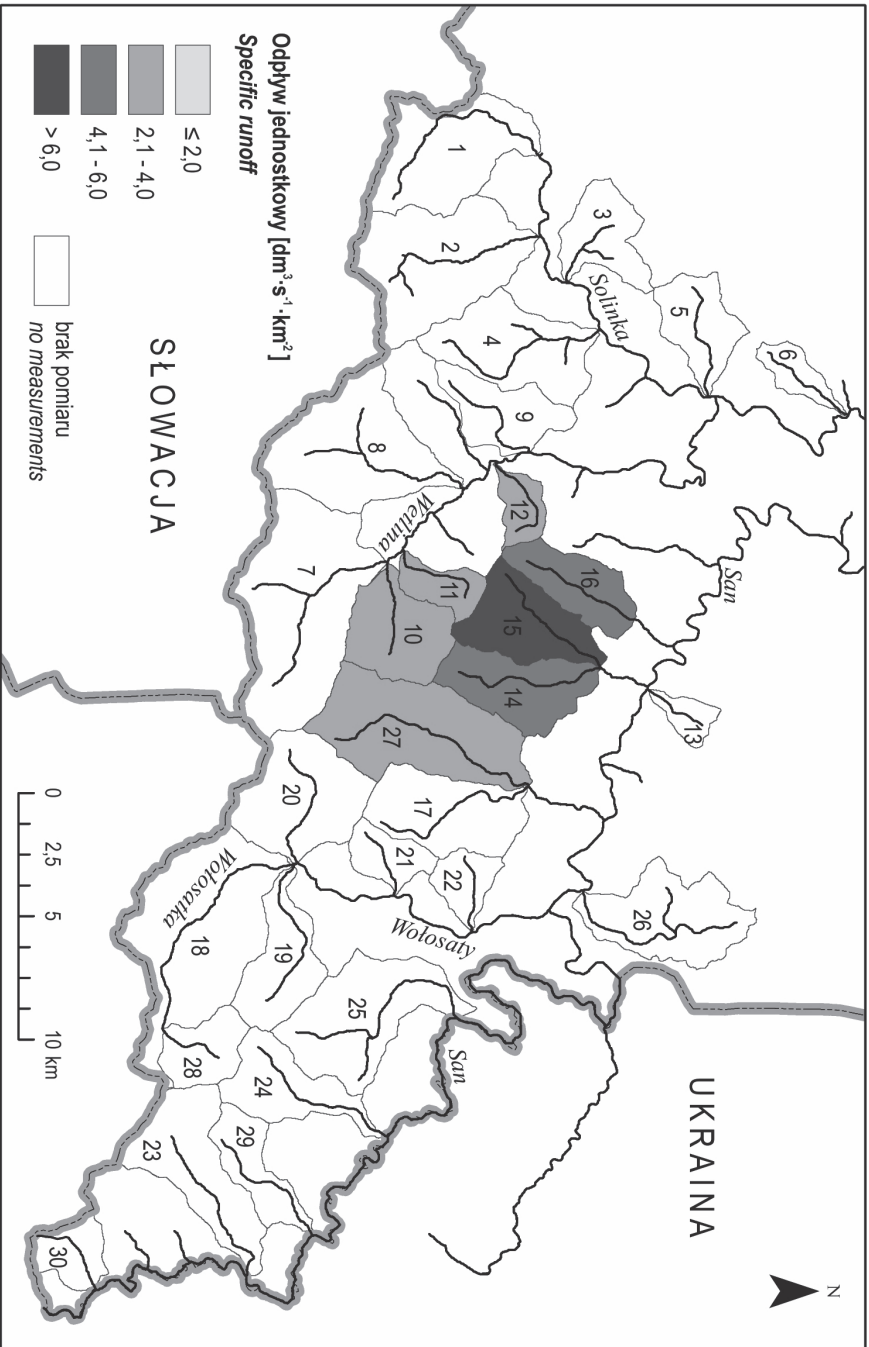
Table 2. Pearson correlation coefficient between groundwater specific runoff (q) and catchment characteristics. Significant correlations are bolded.

Odpływ jednostkowy <i>Specific runoff</i>		q (10/2009)	q (07/2015)	q (09/2015)	q (09/2016)
q (10/2009)		1,00			
q (07/2015)		0,37	1,00		
q (09/2015)		0,06	0,32	1,00	
q (09/2016)		0,38	0,85	0,49	1,00
Parametr zlewni <i>Catchment characteristics</i>		q (10/2009)	q (07/2015)	q (09/2015)	q (09/2016)
Ekspozycja / <i>Aspect</i> 0		-0,06	0,09	-0,21	-0,35
Ekspozycja / <i>Aspect</i> N, 315-45°		0,07	0,67	0,41	0,24
Ekspozycja / <i>Aspect</i> E, 45-135°		-0,04	0,68	-0,16	-0,16
Ekspozycja / <i>Aspect</i> S, 135-225°		-0,26	-0,53	-0,58	-0,32
Ekspozycja / <i>Aspect</i> W, 225-315°		0,18	-0,74	0,39	0,24
Średnie nachylenie <i>Average slope</i>		0,47	0,14	0,65	0,50
Powierzchnia zlewni <i>Catchment area</i>		0,09	0,26	-0,27	0,05
Wysokość minimalna <i>Minimum elevation</i>		-0,09	-0,44	-0,34	0,07
Wysokość maksymalna <i>Maximum elevation</i>		0,24	0,28	-0,07	0,37
Deniwelacja <i>Height difference</i>		0,35	0,49	0,29	0,46
Wysokość średnia <i>Average elevation</i>		0,17	-0,51	-0,04	0,37
Udział jednostek w powierzchni zlewni <i>Share of tectonic units in catchment area</i>	śląska <i>Silesian</i>	0,10	0,25	0,63	0,02
	przeddukielska <i>Fore-Dukla</i>	-0,27	-0,30	-0,66	-0,13
	dukielska <i>Dukla</i>	0,07	-0,05	-0,47	0,07

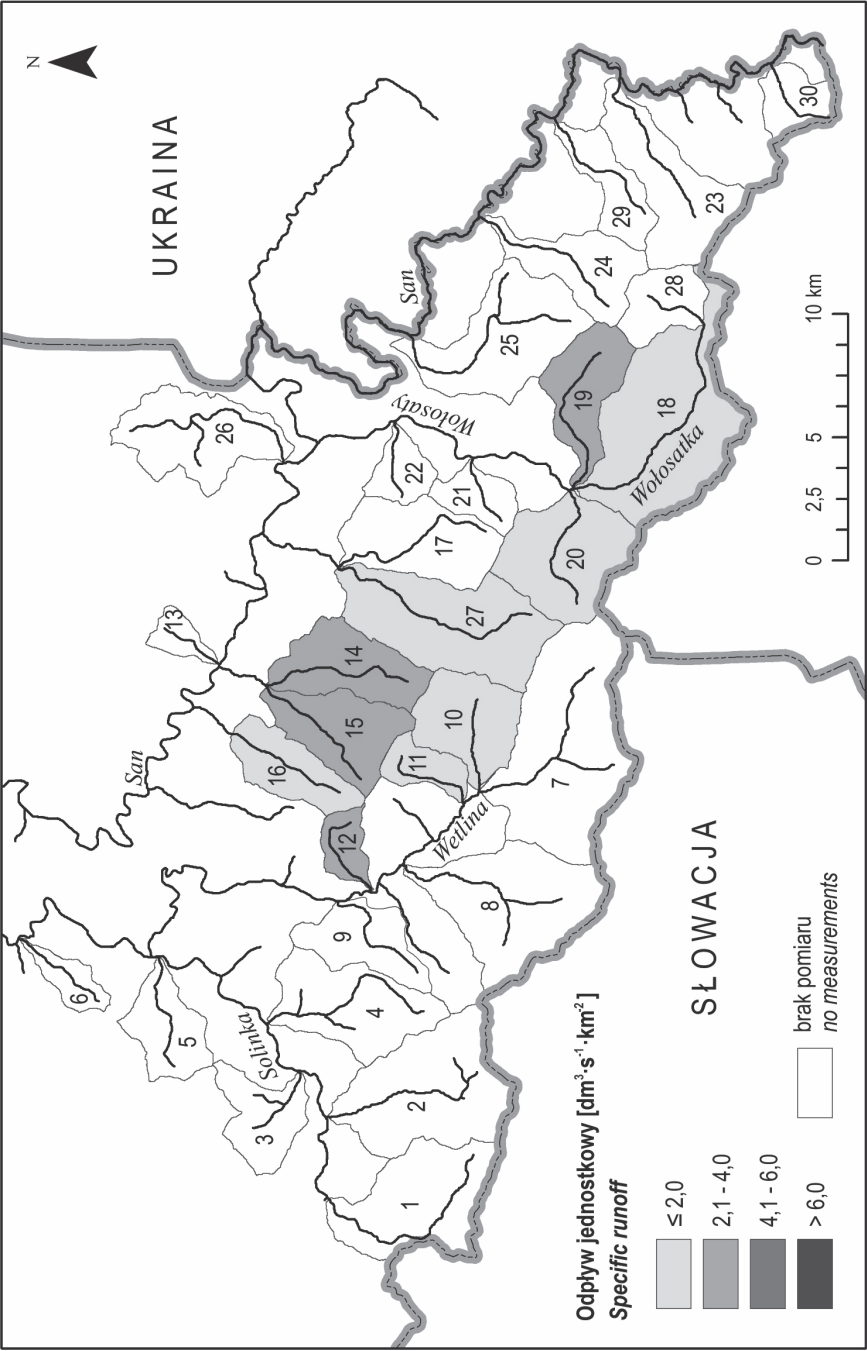


Ryc. 4. Odpływ jednostkowy z badanych zlewni w dniach 3–6 października 2009 (na podstawie Plenzler i in. 2010).

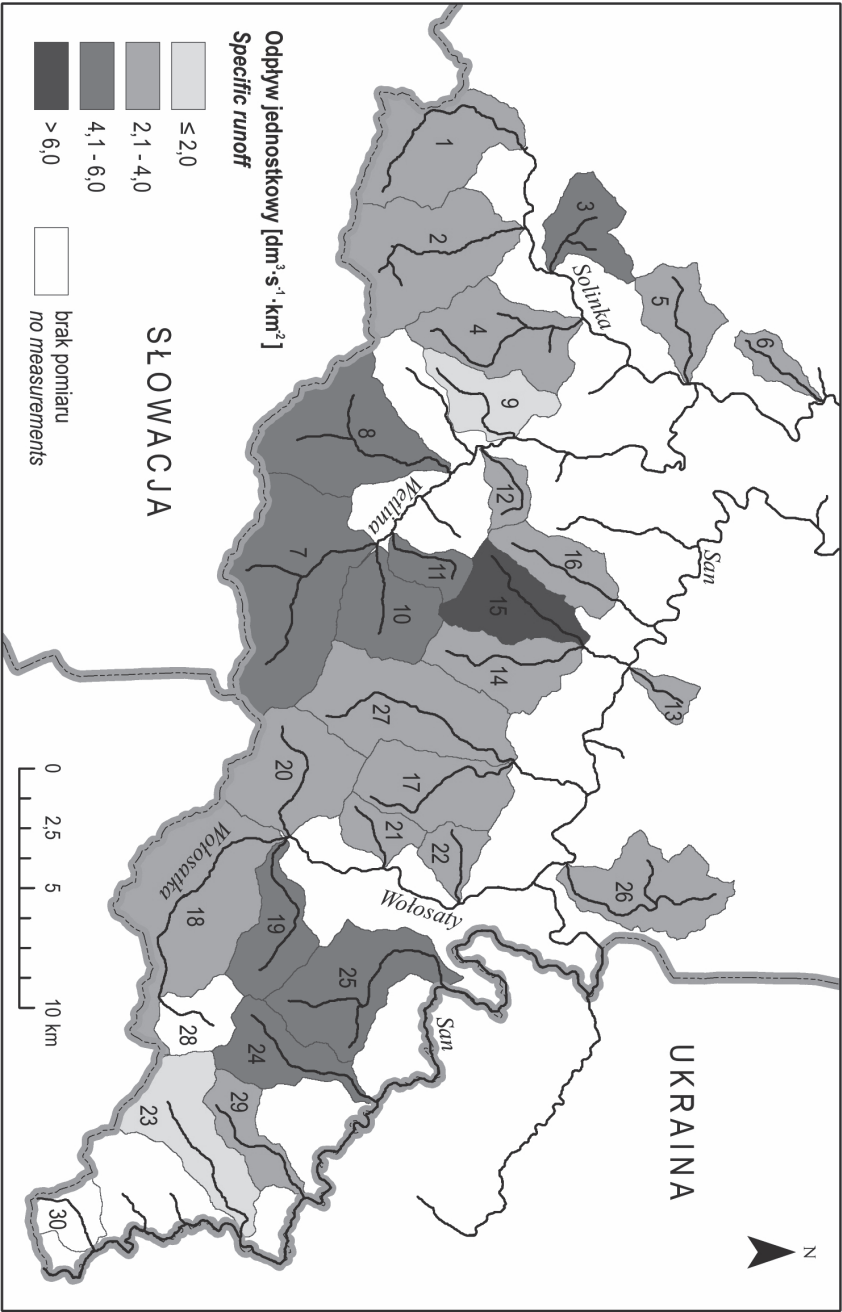
Fig. 4. Specific runoff in the studied catchments in 3rd–6th October, 2009 (based on Plenzler et al. 2010).



Ryc. 5. Odpyw jednostkowy z badanych zlewni w dniach 1–2 lipca 2015 (na podstawie Dojrowska 2016).
Fig. 5. Specific runoff in the studied catchments in 1st–2nd July, 2015 (based on Dojrowska 2016).



Ryc. 6. Odpływ jednostkowy z badanych zlewni w dniach 22–24 września 2015 (na podstawie Rzonca i in. 2016).
Fig. 6. Specific runoff in the studied catchments in 22nd–24th September, 2015 (based on Rzonca et al. 2016).



Ryc. 7. Odpyw jednostkowy z badanych zlewni w dniach 21–22 września 2016.
Fig. 7. Specific runoff in the studied catchments in 21st–22nd September, 2016.

Dyskusja

Średnie wieloletnie wartości odpływu podziemnego w obszarze Karpat fliszowych wynoszą od 3 do $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, przy czym najwyższe wartości cechują wyższe partie Beskidów, m.in. Beskidu Śląskiego, Żywieckiego czy Bieszczadów (Jokiel 1994; Bartnik 2005). Jednocześnie wschodnia część polskich Karpat Zewnętrznych, obejmująca Bieszczady, wyróżnia się na tle pozostałych obszarów fliszowych wolniejszym tempem szczyptywania zasobów i mniejszą pojemnością zbiorników wód podziemnych (Jokiel 1994). W szczegółowych badaniach dynamiki szczyptywania zasobów wód podziemnych i ich potencjału zasobności, opartych na analizie krzywych wysychania cieków, wykazano jednak, że w mniejszych, wyżej położonych zlewniach w Bieszczadach można spodziewać się lokalnego wzrostu potencjału zasobności (Mostowik i in. 2018).

Przeprowadzona w niniejszej pracy analiza odpływów jednostkowych w okresach niżówkowych, utożsamianych z odpływami podziemnymi, również potwierdza lokalne zróżnicowanie tej składowej odpływu, pośrednio świadcząc o zróżnicowanej zasobności zbiorników wód podziemnych zasilających badane cieki. Wszystkie uwzględnione w pracy wartości chwilowego podziemnego odpływu jednostkowego mieściły się w szerokim zakresie od 0,9 do $7,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Podobne zróżnicowanie odpływu jednostkowego w czasie niżówek zauważano w innych małych zlewniach w obszarach fliszowych – w zlewniach cząstkowych Kryniczanki w Beskidzie Sądeckim wartości odpływu jednostkowego wynosiły od 1,6 do $11,6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Ciężkowski i in. 1999), w subzlewniach górnej Wołosatki w Bieszczadach od 1,8 do $9,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Siwek i in. 2009), w małych zlewniach Bieszczadzkiego Parku Narodowego od 0,1 do prawie $4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Łajczak 1996). W latach 2012–2013 absolutnie najniższe wartości odpływu jednostkowego ze zlewni odwadniających masyw Babiej Góry wyniosły $2,7 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ w półroczu zimowym i $4,6 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ w półroczu letnim (Franczak i in. 2015). Przestrzenne zróżnicowanie odpływu podziemnego obserwowano również w małych zlewniach górskich Pienin (Humnicki 2003) i Sudetów (Buczyński 2017).

Stosunkowo słabe zależności między odpływem jednostkowym ze zlewni bieszczadzkich w poszczególnych seriach pomiarowych wskazują na zróżnicowane funkcjonowanie zbiorników wód podziemnych, uwarunkowane złożeniem wielu czynników m.in. topografii terenu, litologii podłoża, obecnością deformacji tektonicznych i warunków meteorologicznych poprzedzających okres pomiarowy. W nawiązaniu do uzyskanych w tej pracy wyników, większego odpływu podziemnego w Bieszczadach należy spodziewać się w zlewniach o stromych stokach i dużych deniwelacjach, w których budowie geologicznej dominuje flisz piaskowcowy. Należy podkreślić, że w analizowanym obszarze wielkość powierzchni zlewni i jej średnia wysokość nie wpływają na wielkość zasilania pod-

ziemnego cieków. Na brak zależności między odpływem podziemnym i wielkością zlewni wskazywała również w swoich badaniach m.in. I. Dynowska (1976), podając przykłady zlewni zarówno karpackich, jak i położonych poza obszarami górskimi. Silny związek podziemnego odpływu jednostkowego z budową geologiczną w obszarze fliszowym jednostki magurskiej udokumentował Ciężkowski i in. (1999), otrzymując znacznie wyższe wartości podziemnego odpływu jednostkowego w subzlewniach Kryniczanki położonych w strefie bystrzyckiej w porównaniu do odpływu ze zlewni zlokalizowanych w strefie krynickiej. A. Łajczak (1996) podkreślał, że wyższe wartości odpływu jednostkowego w Bieszczadzkim Parku Narodowym występują w małych zlewniach o głębiej wciętych dolinach, z rozległymi niszami źródłkowymi i tam, gdzie występują osuwiska.

Wśród obszarów wyraźnie odznaczających się powtarzalnie wysokimi wartościami podziemnego odpływu jednostkowego w Bieszczadach należy wskazać zlewnie odwadniające północne stoki Połoniny Wetlińskiej (Hulski, Hylaty, Głęboki-Rzeka) i Pasma Granicznego (Górna Solinka, Smerek), a także gniazdo Tarnicy (Terebowiec, Muczny, górna Wołosatka). Obszary te zbudowane są przede wszystkim z gruboławicowych piaskowców otryckich jednostki śląskiej i z fliszu piaskowcowego warstw ciśnieńskich jednostki dukielskiej (Haczewski i in. 1998; Jankowski i Ślaczka 2000; Haczewski i in. 2001; Malata i in. 2006; Jankowski 2009; Rubinkiewicz i Tomaszczyk 2009). To właśnie te uszczelinione piaskowce tworzą najbardziej zasobne poziomy wodonośne w trzeciorzędowych kompleksach fliszowych omawianego obszaru (Chowaniec 1998/1999). Ponadto, strefy wychodni fałdu Suchych Rzek i Zatwarnicy (rejon Połoniny Wetlińskiej) odznaczają się wyjątkowo wysoką porowatością i przepuszczalnością makroszczelinową w relacji do pozostałej części centralnego synklinorium karpackiego, co skutecznie ułatwia infiltrację wód opadowych (Machowski 2010). Potwierdzeniem większych zasobów wód podziemnych po północnej stronie Pasma Połoniny Wetlińskiej jest również występowanie licznych źródeł i młak, z których część cechuje się dużą – jak na warunki fliszowe – średnią roczną wydajnością rzędu kilku $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i stałym funkcjonowaniem w ciągu roku, mimo położenia blisko strefy grzbietowej Połoniny (Mocior i in. 2015; Mostowik i in. 2016; Płaczkowska i in. 2018). Również w zlewni górnej Wołosatki notowano wyższe niż przeciętne w Karpatach wartości wskaźnika krenologicznego (liczba wypływów wód podziemnych na jednostkę powierzchni) i występowanie kilku źródeł o wydajności powyżej $1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Rzonca i in. 2008).

Podsumowanie

Chwilowy odpływ jednostkowy ze zlewni elementarnych w Bieszczadach, otrzymany na podstawie pomiarów podczas czterech okresów niżówkowych, wykazuje duże zróżnicowanie. Wielkość odpływu rzecznego, pochodzącego wy-

łącznie z podziemnego zasilania cieków, nie jest funkcją powierzchni zlewni i nie jest też związana z jej średnią wysokością. Wyraźny jest natomiast wzrost podziemnego odpływu jednostkowego wraz ze wzrostem nachylenia stoków i deniwelacji zlewni. Najwyższe wartości odpływu jednostkowego są charakterystyczne dla obszarów, w podłożu których dominuje gruboławicowy flisz z przewagą piaskowców, których uszczelnienie pozwala na efektywną infiltrację wód opadowych i zasilanie zbiorników wód podziemnych. Do zlewni o największych zasobach wodnych w okresach niżówkowych należą zlewnie odwadniające gniazdo Tarnicy, pasma Szerokiego Wierchu i Bukowego Berda oraz zlewnie odwadniające w kierunku północnym Połoninę Wetlińską i Pasma Graniczne (od Okrąglika po Wielką Rawkę).

Przeprowadzone badania potwierdziły, sygnalizowaną już w innych obszarach zbudowanych ze skał fliszowych, prawidłowość dużego zróżnicowania odpływu podziemnego w zlewniach elementarnych danego regionu. Znajomość przestrzennego zróżnicowania zasobności wodnej zlewni pozwala na efektywniejsze gospodarowanie tymi zasobami, obejmujące również potrzeby retencjonowania wody. Za główne czynniki mające wpływ na to lokalne zróżnicowanie należy uznać topografię obszaru oraz budowę geologiczną wraz z przebiegiem wielko- i małoskalowych deformacji tektonicznych, występujących na danym obszarze.

W pracy wykorzystano wyniki badań prowadzonych w ramach projektu badawczego *Obieg wody w małych zlewniach w Karpatach fliszowych na przykładzie Połoniny Wetlińskiej (Bieszczady Wysokie, Polska)* o nr 2016/23/N/ST10/01327 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Załącznik 1. Parametry badanych zlewni elementarnych w Bieszczadach.
Appendix 1. Characteristics of studied catchments in the Bieszczady Mts.

L.p. / ID	Powierzchnia / Area [km ²]	Ekspozycja / Aspect [%]					Średnie nachylenie Average slope [°]	Wysokość [m n.p.m.] Altitude [m a.s.l.]					Udział jednostek geologicznych Geological units [%]			
		0 flat	N 315-45°	E 45-135°	S 35-225°	W 25-315°		min	max	max- -min	średnia average	śląska Silesian	przeddukiel- ska Fore-Dukla	dukielska Dukla		
1	21,9	0,0	26,9	14,4	26,1	32,6	11,7	630,0	1100,0	470,0	808,2	0,0	0,0	100,0	0,0	
2	27,9	0,0	30,3	22,1	20,5	27,1	15,9	572,0	1150,0	578,0	813,5	0,0	0,0	100,0	0,0	
3	10,2	0,0	20,9	35,0	24,5	19,6	15,2	545,0	1065,0	520,0	741,4	1,0	73,3	25,7	0,0	
4	19,1	0,0	39,0	25,9	14,0	21,1	14,8	518,0	1150,0	632,0	761,0	8,2	54,3	37,6	0,0	
5	10,3	0,0	29,3	36,4	25,5	8,8	14,3	467,0	1065,0	598,0	696,8	100,0	0,0	0,0	0,0	
6	4,4	0,0	37,4	46,9	4,8	10,9	13,6	419,0	888,0	469,0	621,9	100,0	0,0	0,0	0,0	
7	37,8	0,0	31,2	21,2	21,6	26,0	17,3	657,0	1301,0	644,0	934,6	0,0	0,8	99,2	0,0	
8	26,8	0,0	31,9	29,3	15,6	23,1	15,9	602,0	1195,0	593,0	877,1	0,0	15,9	84,1	0,0	
9	11,4	2,2	27,3	40,9	21,3	8,3	10,6	567,0	1042,0	475,0	705,0	13,0	75,0	12,0	0,0	
10	14,3	0,0	30,7	7,5	36,1	25,7	13,8	658,0	1246,0	588,0	874,7	26,1	56,2	17,7	0,0	
11	5,5	0,0	12,6	8,4	39,1	39,8	14,0	644,0	1206,0	562,0	862,3	64,1	35,9	0,0	0,0	
12	4,6	0,0	24,9	4,7	23,8	46,6	16,7	577,0	1213,0	636,0	846,5	92,9	7,1	0,0	0,0	
13	3,3	0,0	2,9	18,0	35,3	43,8	14,9	493,0	839,0	346,0	694,6	100,0	0,0	0,0	0,0	
14	14,5	0,0	37,4	24,5	9,7	28,4	17,0	534,0	1246,0	712,0	809,2	100,0	0,0	0,0	0,0	
15	14,4	0,0	37,5	32,2	11,4	18,9	16,2	535,0	1247,0	712,0	810,3	100,0	0,0	0,0	0,0	
16	10,8	0,6	33,6	32,3	15,6	17,8	15,7	531,0	1213,0	682,0	782,0	100,0	0,0	0,0	0,0	

17	17,4	0,0	35,3	26,1	11,9	26,7	16,2	570,0	1285,0	715,0	844,8	100,0	0,0	0,0
18	44,3	0,0	23,7	20,1	27,0	29,2	13,5	650,0	1340,0	690,0	908,1	52,1	27,2	20,7
19	12,9	0,0	37,6	8,8	17,5	36,1	16,7	653,0	1317,0	664,0	958,0	99,1	0,9	0,0
20	20,4	0,0	29,1	31,6	33,4	5,8	14,0	647,0	1301,0	654,0	869,2	24,0	52,6	23,4
21	6,0	0,0	30,7	37,6	24,4	7,3	16,3	606,0	1226,0	620,0	835,4	100,0	0,0	0,0
22	5,5	0,0	39,3	34,7	23,8	2,2	14,3	563,0	1008,0	445,0	762,2	100,0	0,0	0,0
23	19,5	0,1	34,3	35,4	23,0	7,2	10,5	708,0	1323,0	615,0	909,4	100,0	0,0	0,0
24	12,8	0,0	34,5	41,6	7,2	16,6	14,6	651,0	1320,0	669,0	975,4	100,0	0,0	0,0
25	22,9	0,0	39,2	27,5	12,3	21,0	13,1	616,0	1304,0	688,0	835,9	100,0	0,0	0,0
26	18,6	0,1	19,1	32,1	29,9	18,7	9,1	529,0	939,0	410,0	653,0	100,0	0,0	0,0
27	28,0	0,0	31,6	27,5	19,5	21,4	15,9	570,0	1286,0	716,0	856,9	72,4	20,0	7,6
28	8,3	0,0	4,5	21,1	34,5	39,9	15,5	818,0	1340,0	522,0	1064,5	100,0	0,0	0,0
29	9,1	0,0	35,3	42,1	10,6	12,0	10,0	679,0	1241,0	562,0	849,7	100,0	0,0	0,0
30	6,9	0,0	34,8	34,4	15,6	15,2	6,3	783,0	1024,0	241,0	861,4	100,0	0,0	0,0

Literatura

- Bartnik A. 2005. Odpływ niski w Polsce. *Acta Geographica Lodziensia* 91: 1–95.
- Birsan M.-V., Molnar P., Burlando P., Pfaundler M. 2005. Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology* 314: 312–329.
- Buczyński S. 2017. Odpływ podziemny w małych zlewniach górskich Sudetów. *Prace Geograficzne* 151: 7–26.
- Chelmiński W., Pociąg-Karteczka J., 2006. Odpływ podziemny W: J. Pociąg-Karteczka (red.). *Zlewnia. Właściwości i procesy*. Wyd. UJ, Kraków, ss. 199–208.
- Chowaniec J. 1998/1999. Wody podziemne polskich Karpat Fliszowych. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 29–30: 113–133.
- Ciężkowski W., Kozłowski J., Liber-Madziarz E., Przylibski T.A., Żak S. 1999. Zróżnicowanie modułu odpływu podziemnego w zlewni Kryniczanki w okresie niżówkowym. *Przegląd Geologiczny* 47 (6): 564–566.
- Dojtrowska I. 2016. Zróżnicowanie odpływu jednostkowego w masywie Połoniny Wetlińskiej. *Archiwum Prac Magisterskich. Zakład Hydrologii IGiGP UJ. Kraków*.
- Dynowska I. 1971. Przestrzenna zmienność procentowego udziału podziemnego zasilania rzek polskich. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 5: 5–13.
- Dynowska I. 1976. Poglądy na wpływ elementów środowiska geograficznego na podziemne zasilanie rzek w Polsce. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 10: 43–52.
- Dynowska I. 1997. Reżim odpływu rzeczny. W: *Atlas Rzeczypospolitej Polskiej. Główny Geodeta Kraju, Warszawa*.
- Franczak P., Hudyka M., Buczek K., Górnik M. 2015. Zróżnicowanie przestrzenne i zmienność odpływu w zlewniach fliszowych na obszarze Masywu Babiej Góry. *Annales UMCS Sectio B* 70 (1): 95–116.
- Haczewski G., Bąk K., Kukulak J. 1998. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000. Arkusz 1069 – Dźwiniacz Górny, Państwowy Instytut Geologiczny.
- Haczewski G., Bąk K., Kukulak J., Mastella L., Rubinkiewicz J. 2001. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000. Arkusz 1068 – Ustrzyki Górne, Państwowy Instytut Geologiczny.
- Humnicki W. 2003. Odpływ podziemny w wybranych zlewniach Pienińskiego Parku Narodowego. *Pieniny – Przyroda i Człowiek* 8: 41–51.
- Jankowski L. 2009. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000. Arkusz 1064 – Łupków, Państwowy Instytut Geologiczny.
- Jankowski L., Ślaczka A. 2000. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000. Arkusz 1065 – Jabłonki, Państwowy Instytut Geologiczny.
- Jokić P. 1994. Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany wody w Polsce. *Acta Geographica Lodziensia* 66/67: 1–236.
- Kostuch M. 2003. Odpływy podziemne i niskie w potokach górskich. *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie*. 3 (1): 193–203.
- Kowalczyk A. 2016. Niżówka hydrogeologiczna – przyczyny i skutki. *Technologia Wody* 5 (49): 4–10.
- Kryza H., Kryza J., Limisiewicz P. 1989. Zmienność odpływów niskich obszaru sudeckiego i jej przyczyny. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej* 58: 69–74.

- Łajczak A. 1996. Warunki hydrologiczne. W: S. Skiba (red.), Plan ochrony Bieszczadzkiego Parku Narodowego. Operat ochrony przyrody nieożywionej i gleb, Kraków–Ustrzyki Dolne, BdPN, manuskrypt, ss. 12–38.
- Łajczak A. 2016. Wody Babiej Góry. Monografie Babiogórskie, Babiogórski Park Narodowy, Maków Podhalański, 423 ss.
- Machowski G. 2010. Parametry zbiornikowe mikroporowo-szczelinowych piaskowców krośnieńskich w ropogazonośnej strefie centralnego synklinorium karpackiego. Rozprawa doktorska, AGH, 189 ss.
- Malata T., Jankowski L., Żyto K. 2006. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000. Arkusz 1066 – Lutowiska, Państwowy Instytut Geologiczny.
- Mocior E., Rzonca B., Siwek J., Plenzler J., Płaczowska E., Dąbek N., Jaśkowicz B., Potoniec P., Roman S., Zdziebko D. 2015. Determinants of the distribution of springs in the upper part of a flysch ridge in the Bieszczady Mountains in southeastern Poland. Episodes 38 (1): 21–30.
- Mostowik K. 2017. Odpływ rzeczny w Bieszczadach Wysokich w latach 1961–2015. Prace Geograficzne 151: 75–91.
- Mostowik K., Górnik M., Jaśkowicz B., Maciejczyk K., Murawska M., Płaczowska E., Rzonca B., Siwek J. 2016. High discharge springs in the Outer Flysch Carpathians on the example of the High Bieszczady Mountains (Poland). Carpathian Journal of Earth and Environmental Science Research, 11 (2): 395–404.
- Mostowik K., Kisiel M., Siwek J., Rzonca B. 2018. Potencjał zasobności zbiorników wód podziemnych w Bieszczadach Wysokich. Przegląd Geograficzny 90 (1): 93–110.
- NASA JPL. 2013. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second, SRT-M1N49E022V3. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Pińskwar I., Choryński A., Graczyk D., Kundzewicz Z.W. 2018. Observed changes in extreme precipitation in Poland: 1991–2015 versus 1961–1990. Theoretical and Applied Climatology 135 (1–2): 773–787.
- Plenzler J., Bajorek J., Jaśkowicz B., Kołodziej A., Rzonca B., Siwek J., Wójcik S. 2010. Podziemny odpływ jednostkowy w Bieszczadach Wysokich. Przegląd Geologiczny 58: 1147–1151.
- Płaczowska E., Siwek J., Maciejczyk K., Mostowik K., Murawska M., Rzonca B. 2018. Groundwater capacity of a flysch-type aquifer feeding springs in the Outer Eastern Carpathians (Poland). Hydrology Research 49 (6): 1946–1959.
- Rubinkiewicz J., Tomaszczyk M. 2009. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski. Arkusz 1067 – Wetlina, Państwowy Instytut Geologiczny.
- Rzonca B., Kołodziej A., Laszczak E., Mocior E., Plenzler J., Płaczowska E., Rozmus M., Siwek J., Ścisłowicz B., Wójcik S., Ziółkowski L. 2008. Źródła w zlewni górnej Wołosatki w Bieszczadach Wysokich. Przegląd Geologiczny 56: 772–779.
- Rzonca B., Siwek J. (red.) 2011. Hydrologia Bieszczadów Zlewnie Sanu i Solinki powyżej Jeziora Solińskiego. IGiP UJ, Kraków, 89 ss.
- Rzonca B., Siwek J., Zawilo M., Bryndza M., Dojrowska I., Lasota J., Piech K., Sajdak M. 2016. Niżówka w Bieszczadach w 2015 roku. Roczniki Bieszczadzkie 24: 263–279.
- Siwek J., Kołodziej A., Laszczak E., Mocior E., Plenzler J., Płaczowska E., Rozmus M., Rzonca B., Ścisłowicz B., Wójcik S., Ziółkowski L. 2009. Geologiczne i geomorfologiczne uwarunkowania wykształcenia sieci hydrograficznej w zlewni górnej Wołosatki (Bieszczady Wysokie). Geologia 35 (2): 249–261.

- Staśko S., Tarka R., Buczyński S. 2017. Ekstremalne zdarzenia meteorologiczne i ich odzwierciedlenie w stanach wód podziemnych (przykłady z Dolnego Śląska). *Przegląd Geologiczny* 65: 1244–1248.
- Ślaczka A., Żyto K. 1978. Mapa geologiczna Polski bez utworów czwartorzędowych 1:200 000, Arkusz Łupków. Wyd. IG, Warszawa.
- Tomaszewski E. 2001. Sezonowe zmiany odpływu podziemnego w Polsce w latach 1971–1990. *Acta Geographica Lodziensia* 79: 1–149.
- Viviroli D., Archer D.R., Buytaert W., Fowler H.J., Greenwood G.B., Hamlet A.F., Huang Y., Koboltschnig G., Litaor M.I., López-Moreno J.I., Lorentz S., Schadler B., Schreier H., Schwaiger K., Vuille M., Woods R. 2011. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 471–5.

Summary

Groundwater resources of the Bieszczady Mountains, as of many other mountain areas built of flysch rocks in the Outer Carpathians, are considered to be low. Despite low storage capacity of flysch rocks, groundwater recharge is crucial for river flow during dry periods. In addition, river water resources are used as a basic source of drinking water for humans in the Bieszczady Mountains. Preliminary research showed that specific runoff during dry periods varies across the Bieszczady Mountains considerably (Plenzler et al. 2010; Rzonca et al. 2016). Thus, the aim of the study was to identify spatial distribution of specific runoff during dry periods in small catchments in the Bieszczady Mountains and to define relations between catchment characteristics and specific runoff.

The dataset used in this study contains specific runoff values in small catchments in the Bieszczady Mountains collected during four study periods (Fig. 1, Table 1), when river flow was low and might have been identified as the effect of groundwater recharge only (Fig. 2). Characteristics of 30 small catchments including their aspect, slope, catchment area, mean, minimum and maximum elevation and the share of tectonic units in a catchment area were defined in this study (Appendix 1). In the next step the correlation coefficients between specific runoff in the studied catchments and the catchment characteristics were calculated.

Specific runoff during dry periods ranged from 0.9 to 7.7 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ in the studied catchments (Fig. 3–7), clearly showing different storage capacity of local groundwater reservoirs. However, the most of defined catchment characteristics does not indicate evident correlation with specific runoff (Table 2). Nevertheless, there exist a relation indicating that catchments with steep slopes as well as with high altitude range are characterized by higher values of specific runoff. In addition, the data proved that prevalence of fractured sandstone formations promotes greater rainfall infiltration and an enlargement of aquifer storage capacity. Thus, catchments located on the northern slopes of the Połonina Wetlińska Range (No.

14, 15, 16 at Fig. 1) and the Border Range (7, 8), and around Tarnica Peak (19, 25, 28) are characterized by substantially higher specific runoff than other studied catchments.

This study has revealed a significant spatial distribution of specific runoff during dry periods in small catchments in the Bieszczady Mountains. According to the obtained results and the results of other studies (Ciężkowski et al. 1999; Plenzler et al. 2010; Franczak et al. 2015; Rzonca et al. 2016), one may suppose that groundwater recharge in small catchments in flysch areas varies considerably. The differences depend mostly on local topography, lithology, small and large scale tectonic deformation. However, our knowledge about the role of several factors affecting spatial distribution of groundwater recharge still need to be improved.